

无线传感器网络中移动式连通研究综述

王 田¹ 缪海星¹ 蒋文贤¹ 赖永炫² 王国军³ 贾维嘉⁴

¹ (华侨大学 计算机科学与技术学院 福建 厦门 361021)

² (厦门大学 软件学院 福建 厦门 361005)

³ (广州大学 计算机科学与教育软件学院 广州 510006)

⁴ (上海交通大学 电子信息与电气工程学院 上海 200240)

E-mail: laiyy@xmu.edu.cn

摘 要: 节点连通性是无线传感器网络研究的热点问题之一,然而由于节点能量耗尽、硬件故障以及通信链路失效等问题的存在,造成网络分割,因此如何确保网络连通成为无线传感器网络亟待解决的关键性问题。近年来,一个新的研究趋势是通过引入计算能力较强且能量较为充足的移动性节点来进行连通控制,提高无线传感器网络的整体性能。本文对目前利用移动性节点的主流连通控制方法进行了充分调研,通过对这些方法的详细分类和比较,归纳了移动式连通控制的各类方法的特点,分析了这些方法的性能和适用范围,总结了研究中存在的主要问题与挑战,并指出了未来可能的研究方向。

关键词: 无线传感器网络; 移动节点; 网络分割; 连通控制

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-1220(2017)01-0056-06

Survey on Connectivity with Mobile Elements in WSNs

WANG Tian¹ MIAO Hai-xing¹ JIANG Wen-xian¹ LAI Yong-xuan² WANG Guo-jun³ JIA Wei-jia⁴

¹ (Department of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

² (College of Software, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

³ (School of Computer Science and Educational Software, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

⁴ (Electronic Information and Electrical Engineering College, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The connectivity of sensors is one of the main research problems in wireless sensor networks (WSNs). Data can be forwarded through connected sensor nodes. However, because of energy depletion, hardware failure and communication link failure, the network may be partitioned. How to guarantee the connectivity becomes an urgent issue in wireless sensor networks. Traditional work usually focuses on maximizing the connectivity with minimum sensors. In recent years, a new research trend is to utilize mobile elements for connectivity control. Since the mobile element is more powerful than normal sensors, it improves the performance of many aspects in wireless sensor networks. In this paper, we make a comprehensive investigation about the current major connectivity control methods with mobile elements. We first summarize the characteristics of mobile topology control methods via a new classification. Based on the classification, these methods are compared to each other according to a series of parameters. Finally, we analyze the performances and the application scopes of these methods, summarize the main problems, and point out the future research directions.

Key words: wireless sensor networks; mobile nodes; network partitioning; connectivity control

1 引言

无线传感器网络(WSNs, Wireless Sensor Networks)由部署在特定区域的大量无线传感器节点通过自组织方式形成^[1]。广泛应用于军事、医疗、救灾、工业等多个领域^[2]。

在WSNs中,节点可能因为能量耗尽、硬件故障以及恶意攻击等原因而失效^[3],进而导致网络分割,降低网络连通性,从而影响网络性能和生存期^[4]。因此,如何通过连通控制减轻这种情况的发生是当前的一大挑战。传统的典型方法通过

调节节点的通信范围来构建理想的拓扑结构^[5],然而其因节点通信范围限制无法彻底解决问题。近几年的研究热点是引入移动性节点,例如通过移动性节点可以进行数据收集^[6],目标跟踪^[7]和目标检测^[8]。另外,通过利用移动节点的机动性来进行连通控制具有更高的灵活性^[9],例如可以调度移动节点取代故障节点以保持网络连通^[10]。本文对利用移动性节点进行连通控制的方法进行充分调研,通过对其分类和比较,归纳了移动式连通控制方法的特点,分析了其性能和适用范围,总结了存在的主要问题,并指出了未来的研究方向。

收稿日期: 2016-02-29 收修改稿日期: 2016-05-13 基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划项目(2015CB352401)资助; 国家科技支撑计划项目(2015BAH16F00/F01/F02)资助; 国家自然科学基金项目(61572206, 61472451, 61672441)资助; 福建省科技计划重点项目(2014H0030)资助; 福建省自然科学基金计划项目(2014J01240)资助。作者简介: 王 田,男,1982年生,博士,副教授,研究方向为无线传感器网络、移动计算、物联网; 缪海星,男,1991年生,硕士研究生,研究方向为移动计算、无线传感器网络; 蒋文贤,男,1974年生,硕士,副教授,研究方向为无线传感器网络; 赖永炫(通信作者),男,1981年生,博士,副教授,研究方向为机会网络、传感器网络数据管理和数据库; 王国军,男,1970年生,博士,教授,研究方向为可信计算、移动计算、智能计算; 贾维嘉,男,1957年生,博士,教授,研究方向为任播路由、容错计算、无线通信。

本文将从以下几个方面展开介绍: 第 2 节简要介绍移动式连通控制的概念以及度量指标; 第 3 节简要说明了移动式连通控制方法存在的一些问题; 第 4 节介绍了不同分类方法并提出新的分类; 第 5 节利用提出的分类方法分类介绍移动式连通控制方法; 第 6 节是对第 5 节的分析、总结, 并提出发现的问题; 第 7 节给出移动式连通控制的发展趋势和需要重点关注的研究方向, 并对全文进行总结。

2 移动式连通控制问题概述及度量指标

2.1 问题描述

连通控制是 WSNs 研究的核心问题之一, 其对延长网络生存期、提高网络协议效率等都有积极意义。连通控制需要在保证网络连通的前提下延长网络生存期。传统保持网络连通的方法是在区域部署大量节点, 提高平均节点度。

随着移动 WSNs 研究的不断深入, 对连通控制方法的研究有了新的方向, 即引入移动性节点来应对连通要求。当部分区域连通度降低时, 移动性节点移动到相应位置以修复或提高连通度。移动性节点的引入增加了故障修复的灵活性, 缩短了故障修复时间, 为其它功能提供了可靠保障。例如当网络分割时, 移动节点可以通过移动作为中继节点连接分割的网络进行修复。因此移动式连通控制就是利用节点移动性保障网络连通性以延长网络生存期。

2.2 主要度量指标

移动式连通控制的度量指标主要有以下几种:

1) 故障修复速度

故障修复速度是 WSNs 服务性能的主要度量标准之一。当节点发生故障时, 如何及时修复故障是保证网络性能的条件之一。只有及时地修复节点故障, 才能改善网络生存期。

2) 网络连通性

在实际应用中, 传感网的规模一般较庞大, 节点感知到的数据信息需要通过多跳转发到汇聚节点, 因此必须保证网络连通性才能使数据转发过程顺利进行。网络连通性的强弱可以通过连通等级进行评判, 如果网络中任意两个节点都有 k 条不相交的通信链路, 那么说明这个网络是 k 连通的。 k 值越大代表网络的连通性越强, 就越能应对网络故障。

3) 节点移动距离

节点需要移动的距离, 节点的移动需要消耗能量与时间, 因此在满足需求的前提下最小化节点的移动距离可以在一定程度上加快故障恢复速度, 延长网络生存期。

4) 均衡网络能耗

节点的能量非常有限, 而数据通信及节点的移动等都需要消耗能量, 另外不同节点的能耗不均, 因此均衡网络中各个节点的能耗以尽量延长网络生命期是其一个重要指标。

根据实际 WSNs 所需要满足的应用需求, 从以上选择相应的指标进行评判。

3 存在的问题及挑战

目前移动式连通控制技术主要存在如下问题及挑战:

1) 如何确定合适的移动节点数量

WSNs 的规模通常都比较大, 节点数量较多。利用移动性

节点可以解决网络的连通性问题, 但是过多的移动性节点又会增加网络的成本, 因此如何根据实际的应用场合来确定合适的移动节点数量来进行连通控制是一个重要挑战。

2) 提高网络中节点定位精度

利用移动节点来解决连通控制问题需要定位故障点及移动节点位置, 这样才能使移动节点移动到故障处以解决连通问题。然而, 由于 WSNs 的实际应用环境十分复杂, 节点定位会受到各种环境因素的干扰, 导致定位不准确, 因此如何规避环境的干扰来提高节点定位的精度是一个重要问题。

3) 移动节点的能量消耗

实际上, 移动节点并非毫无限制。虽然一般情况下移动节点的能量较多, 但是其能量仍是有限的。移动节点进行通信、移动以及计算等都需要消耗能量, 因此如何降低移动节点的能耗也是移动式连通控制方法当前存在的问题之一。

4 移动式连通控制方法的分类

依据不同的分类标准, 移动式连通控制有多种分类方法, 例如根据连通控制的目的不同可以分为针对网络覆盖和针对网络连通两种分类方法等, 典型的分类方法有如下几类:

1) 基于移动节点比例的分类

根据组成网络的节点中移动节点所占的比例不同, 可分为全移动节点和部分移动节点两种方法。全移动节点方法中网络中节点全部是移动节点, 灵活性高, 成本也相对较高; 部分移动节点方法是指在网络中只需要较少的移动节点与固定节点配合以实现连通控制, 成本较低, 同时灵活性也低。

2) 基于算法类型的分类

根据算法类型的不同可分为中心式和分布式两种方法。中心式连通控制方法是指通过单个节点生成修复方案和协调节点重定位的连通控制方法, 不适用于规模较大的网络; 分布式连通控制方法是指在网络中的节点均会参与连通控制过程, 不再只依赖于某一个节点, 这样大大减少了节点的计算量, 使故障修复更加迅速, 适用于大规模网络。

3) 基于网络连通强度的分类

根据网络连通度的不同, 可分为 1-连通和 k -连通网络中的方法。1-连通网络中的方法保证任意两个节点之间至少有一条链路, 成本低, 连通性弱; k -连通网络中的方法要保证任意两个节点间至少有 k 条不相交的链路, k 通常为 2, k 取值越大, 连通性越好, 但是算法复杂度较高。

4) 基于故障数量的分类

根据网络中故障数量的不同, 可分为单故障和多故障两种方法。单故障是指网络中只有单个节点发生故障。多故障指网络中多个节点并发故障而造成的网络分割。

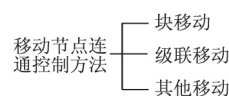


图 1 基于移动节点的连通控制方法分类

Fig. 1 Classification of connectivity control methods with mobile elements

本文对移动式连通控制方法进行调研, 发现基于节点移动方式进行分类能更好的对其进行归纳、总结。因此将移动节

点连通控制方法从网络连通性入手,根据节点移动方式的不同分为如上页图 1 所示的块移动、级联移动和其他移动。

5 典型的移动式连通方法解析

针对节点移动方式的不同分为块移动、级联移动和其它移动。块移动是指将网络分为块树结构,其主要是以块为单位移动。级联移动是指节点移动离开原来的位置后会有邻居节点取代其之前的位置,邻居节点也会通过同样的方式来保持连接。其它移动方式指除了以上两种移动外的移动方式。

5.1 块移动

块移动是指将网络拓扑分为块树结构,节点最多的块作为根块,利用块移动来修复节点故障以确保网络连通性。

文献[11]提出了移动控制算法 MCA (Movement Control Algorithm)。如图 2(a) 所示, c_1 和 c_2 为分割点。如果其失效则网络会被分割为若干子网络(称为块),具有最多节点数的块为根块。如图 2 所示,块 B_1 为根块, B_2 、 B_3 和 B_5 为叶子块。1) 每个叶子块都向父块移动,直到能够连通; 2) 如果父块为空,那么就向父块上游的分割点移动。算法经过几次迭代得到图 2(b) 所示的拓扑。不过该算法是中心式的,不适用于大规模的网络且未考虑定位误差带来的影响。

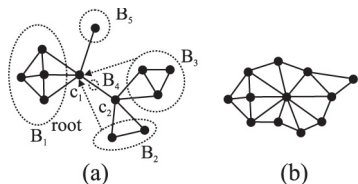


图 2 块树的形成与修复后的网络拓扑

Fig. 2 Formation of block tree and the repaired topology

文献[12]提出算法 LeDiR (Least-Disruptive topology Repair), 在节点故障并造成网络分割时,先判断故障节点的哪个邻居在最小的块上,并移动最小的块修复分割的网络。优点是降低了修复开销,缺点是无法解决多节点并发故障。

文献[13]提出算法 AuR (Autonomous Repair), 其通过移动故障节点周围块中的节点向中心移动,直到成为一个连通网络。优点是降低了整体移动距离,缺点是移动过程没有保障较好的连通性。

块移动是一种经典的算法,根据节点的拓扑结构建立块树。在节点发生故障时,调度块中的节点朝故障节点的方向移动直到网络连通。不过这种方法的移动代价比较大。

5.2 级联移动

级联移动是指当部分节点因要去修复其附近的空洞而引起新的空洞时,其邻居节点做相应的移动以修复之。

文献[14]提出策略 DARA (Distributed Actor Recovery Algorithm)。DARA-1C 确保 1-连通, DARA-2C 确保 2-连通。当节点故障时,移动节点到合适的位置修复连通性。如图 3 所示是 DARA-1C 的例子,节点 A1 发生故障后, A1 邻居节点中度最小的节点 A2 取代 A1, A2 也选择节点取代 A2, 以此类推; DARA-2C 的故障修复过程与 DARA-1C 类似。

文献[15]提出了一种局部算法 RIM (Restoring Interode Connectivity)。如图 4 所示,节点 A、B、G、H 监测到故障节点

F, 会朝向节点 F 的方向移动直到四个节点连通。节点在移动前会通知其邻居节点, 邻居收到的消息后向节点移动。因为故障节点的邻居节点都会朝着故障点移动, 这样势必使得网络中节点整体的移动距离变长, 增加能量消耗。

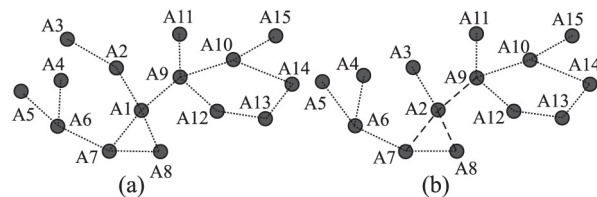


图 3 DARA-1C 故障恢复过程

Fig. 3 Recovery processes of DARA-1C

文献[16]提出了分布式算法 PCR (Partitioning detection and Connectivity Restoration)。节点利用局部信息检测自身成为分割点的可能性。每个节点指定一个邻居节点(一般是非分割点)作为后备节点。后备节点不断地监测节点状态, 当节点发生故障时后备节点向节点移动直到连接修复。其只需要一跳邻居的信息, 降低了通信能量消耗。

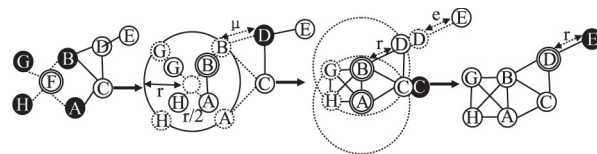


图 4 RIM 算法故障恢复过程

Fig. 4 Recovery processes of RIM algorithm

文献[17]提出了解决大规模节点故障的链路修复算法 HLNf (Handling Large-scale Node Failures)。在多个节点发生故障造成网络分割时, 基站连接不到的分割网络会选举一个领导节点, 领导节点会朝着故障节点移动从而修复网络连通性。其移动代价接近中心式算法, 不过这种节点移动方式势必使得覆盖范围收缩, 且全移动节点也使得网络成本偏高。

文献[18]提出算法 DORMS (Distributed algorithm for Optimized Relay node placement using Minimum Steiner tree)。其在多个分割的网段中选择中继节点, 中继节点朝中心移动直到中继节点能相互通信为止, 分割的网段重新恢复工作。

文献[19]提出算法 PADRA (PARTition Detection and Recovery Algorithm), 其利用连通支配集 (CDS) 来检测节点是否是分割点, 每个分割点都会确定一个合适的邻居节点在该点故障时进行修复。但是该算法无法解决多故障并发的网络分割问题。

文献[20]提出 VCR (Volunteer-instigated Connectivity Restoration) 算法, 其通过扩大故障节点一跳邻居节点的通信半径和朝故障节点移动来修复故障。该算法限定了修复活动范围, 有效降低了平均节点移动距离, 且通信开销少。

级联移动方式思想比较简单, 就是让故障节点的邻居取代故障节点工作, 以此类推, 邻居节点的位置也由其邻居取代。但是这种方法会使得网络的覆盖范围缩小。

5.3 其它移动方式

除了以上的块移动和级联移动的方式, 还存在一些其他的移动方式来进行故障修复的方法, 下面我们将进行介绍。

文献[21]提出了 C^3R (Coverage Conscious Connectivity Restoration) 算法, 不同于简单的让故障节点的邻居节点替代故障节点的方法, 该算法利用故障节点的邻居节点依次移动到故障节点一段时间, 之后再回到原来的位置. 节点的频繁移动时能耗较大, 同时路由表也要频繁更新.

文献[22]提出在移动节点时保持网络连通性的机制 CPCS (Connectivity Preservation and Coverage Schemes). 其基于邻居子集的局部决策, 利用 RNG (Relative Neighborhood Graph) 图的特性确保连通性, 算法分为两个部分: 方向计算和连通性确保方案. 方向计算适应不同的部署方案如区覆盖、点覆盖和栅栏覆盖. 连通性确保方案是为了在部署过程中保持节点连通, 但其对复杂的环境干扰会产生许多误差.

文献[23]提出策略 LMC (Localized movement control) 实现 2-连通. 在分割点没有相邻分割点时两个离分割点最近的节点移动直到连通, 如图 5 (a) 所示. 当分割点有一个相邻分割点时, 如图 5 (b) 所示, 相邻分割点的邻居向着分割点移动直到连通. 其通信开销少, 降低了能耗.

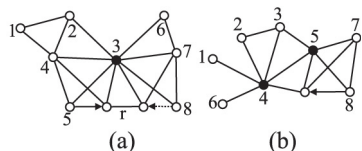


图 5 LMC 修复过程
Fig. 5 Recovery processes of LMC

文献[24]提出利用 NET (Neighbor-Every-Theta) 图确保拓扑连通性的控制策略. 如图 6 所示, NET 图就是节点在通信范围 θ 角度有一条通信边, 这样至少可以保证 $\lfloor \frac{2\pi}{\theta} \rfloor$ 连通性. 文中通过控制移动网络的部署来实现 NET 图, 并且还将

这一连通控制算法拓展到 3D 场景. 优点是保障了连通性, 缺点是调整移动的代价很高, 且需要精确的定位减小误差.

文献[25]提出了针对网络中多节点故障的解决方案 CRS (Connectivity Restoration Strategy). CRS 只需要 k 跳邻居的信息就可以恢复网络正常运行, 首先, 检测故障以及选取最佳的替代节点, 然后通过控制器调度最佳的替代节点移动到指定位置, 但是在这里 k 是需要经过评估选取的.

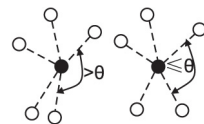


图 6 NET 图移动调整

Fig. 6 Mobile adjustments of NET graph

在文献[26]中, 可移动节点 RN (Removable Nodes) 即非分割点且该节点的移动不会产生新的网络分割. 算法首先要发现并确定可移动节点, 然后针对各个分割点选择合适的可移动节点移动至分割点位置. 虽然有提及移动节点与固定节点联合部署的场景, 但是并没有确定移动节点的数目.

移动式连通控制方法重点是要保障网络中的通信畅通, 避免网络分割. 在由于节点故障导致网络分割的情况下移动节点使得网络恢复连通, 主要问题是确定最优的移动节点调度方案, 尽量减少移动节点的数目, 移动次数和移动距离.

6 现有方法的比较及分析

由于 WSNs 的应用场景、用户需求以及节点构成等各不相同, 移动式连通控制方法具有多样性的特点, 下面的表格是基于本文的分类方法对移动式连通控制方法各种性能指标的比较. 表 1 为移动式连通控制方法的比较.

表 1 移动式连通控制方法

Table 1 Connectivity control algorithm with mobile elements

方法	移动类别	改善覆盖率	节点部署	是否追求多重覆盖	最小化移动距离	方法性质	移动方式	故障类型	多移动节点协作
MCA [11]	块移动	—	全移动节点	—	有	中心式	块移动	单节点故障	无
LeDiR [12]	块移动	—	部分移动节点	—	—	分布式	块移动	单节点故障	有
AuR [13]	块移动	有	全移动节点	否	有	分布式	块移动	多节点故障	有
DARA [14]	级联移动	—	全移动节点	—	有	分布式	级联移动	单节点故障	有
RIM [15]	级联移动	—	全移动节点	否	有	分布式	级联移动	单节点故障	有
PCR [16]	级联移动	—	部分移动节点	—	有	分布式	级联移动	单节点故障	有
HLNF [17]	级联移动	—	全移动节点	否	有	分布式	级联移动	多节点故障	无
DORMS [18]	级联移动	—	全/部分移动节点	否	有	分布式	级联移动	多节点故障	无
PADRA [19]	级联移动	—	部分移动节点	—	有	分布式	级联移动	单节点故障	有
VCR [20]	其他移动	—	部分移动节点	—	有	分布式	级联移动	单节点故障	有
C^3R [21]	其他移动	有	部分移动节点	—	—	分布式	其它移动	单节点故障	有
CPCS [22]	其他移动	有	全移动节点	否	—	分布式	其它移动	单节点故障	有
LMC [23]	其他移动	—	全移动节点	—	有	分布式	其它移动	单节点故障	无
NET [24]	其他移动	有	全移动节点	否	否	分布式	其它移动	多节点故障	有
CRS [25]	其他移动	—	全移动节点	否	有	分布式	其它移动	多节点故障	有
Yan Z [26]	其他移动	—	全/部分移动	否	有	分布式	其它移动	单节点故障	无

表 1 为移动式连通控制方法的特点, 通过比较可以看出:

1) 大部分移动式连通控制方法是分布式的.

在分布式移动式连通控制方法中, 每一个控制节点所需要收集的网络信息相对于中心式移动式拓扑控制方法要少, 因此大大减少了控制节点的计算量和能量等资源. 因此分布

式的方法比较容易受到学者的青睐.

2) 针对多节点故障的移动式连通控制方法较少.

由于单节点故障比较容易解决, 目前对于单节点故障的研究和方法相对较多, 而多节点故障所造成的危害更大且解决难度更高, 但是现有的工作中针对这型的研究较少.

3) 节点移动多采用级联移动的方式。

级联移动相比其他方式思想比较简单且需要的信息量也比较少,只需要朝向邻居节点移动即可,因此现有的工作对这种方法的研究较多。

7 总结与展望

WSNs一般部署在环境相对复杂且恶劣的场景中,由于节点通信能力、计算能力、感知能力有限,外加环境因素等的影响,拓扑结构随时会发生改变,从而影响网络性能,连通控制是解决这类问题的有效方法之一。特别是近年来移动性节点的引入,使得移动式连通控制方法相较于传统的连通控制方法具有更高的灵活性。根据上文中对现有的移动式连通控制方法进行分析、归纳和总结,我们认为移动式连通控制方法还存在以下亟待解决的问题:

1) 设计综合考虑多种指标的方法。

现有方法一般只重点考虑一个指标,因此比较局限。而在实际应用中,连通控制的应用需求是多方面的、综合性的,其各项性能指标具有不同的现实意义,因此考虑多种指标的移动式连通控制方法能更加适用于实际的网络环境中。

2) 针对多故障并发的移动式连通控制方法的设计。

多故障并发对网络连通的影响相比单故障要大一些,修复难度也较高。目前针对多故障问题的方法也不多。在现实的网络环境中,发生多故障的情况也是有的。因此设计针对多故障并发的移动式连通控制方法也是未来的研究方向之一。

3) 将原有的中心式方法拓展为分布式方法。

中心式连通控制方法对于小规模网络来说达到的性能优于分布式方法,但是随着网络规模的扩大,由于节点要对整个网络进行调度,导致其计算量大量增加,而分布式连通控制方法具有更好的适应性。许多中心式方法可以通过拓展成为分布式方法以适应大规模的WSNs。因此需要加强将中心式移动式连通控制方法拓展为分布式方法的研究。

4) 考虑移动节点间的协同合作机制。

WSNs中移动性节点的功能与普通的固定节点相比更加强大,因此可以通过移动性节点间的相互协同合作生成一个最优的移动调度策略,这样不仅可以减少节点计算量还可以防止重复调度等现象的发生。然而,目前几乎没有这方面的研究,是未来需要重点关注的研究方向。

References:

- [1] Kulkarni R V, Förster A, Venayagamoorthy G K. Computational intelligence in wireless sensor networks: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials 2011, 13(1): 68-96.
- [2] Peng Z, Wang T, Bhuiyan M Z A, et al. Dependable cascading target tracking in heterogeneous mobile camera sensor networks [C]. In: Guojun Wang, et al, Algorithms and Architectures for Parallel Processing, Switzerland: Springer International Publishing, 2015: 531-540.
- [3] Li Wen-feng, Fu Xiu-wen. Survey on invulnerability of wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Computers 2015, 38(3): 625-647.
- [4] Wang T, Jia W, Wang G, et al. Hole avoiding in advance routing with hole recovery mechanism in wireless sensor networks [J]. Ad-hoc & Sensor Wireless Networks 2012, 16(1-3): 191-213.
- [5] Han Zhi-jie, Wu Zhi-bin, Wang Ru-chuan, et al. Novel coverage control algorithm for wireless sensor network [J]. Journal on Communications 2011, 32(10): 174-184.
- [6] Lai Y, Xie J, Lin Z, et al. Adaptive data gathering in mobile sensor networks using speedy mobile elements [J]. Sensors 2015, 15(9): 23218-23248.
- [7] Wang T, Peng Z, Chen Y, et al. Continuous tracking for mobile targets with mobility nodes in WSNs [C]. 2014 International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP), New York, USA: IEEE, 2014: 261-268.
- [8] Wang T, Peng Z, Liang J, et al. Detecting targets based on a realistic detection and decision model in wireless sensor networks [C]. Kuai Xu, et al, Springer International Publishing on Wireless Algorithm, Systems and Applications (WASA), Switzerland: Springer International Publishing, 2015: 836-844.
- [9] Younis M, Senturk I F, Akkaya K, et al. Topology management techniques for tolerating node failures in wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks (CN) 2014(58): 254-283.
- [10] Senel F, Younis M. Relay node placement in structurally damaged wireless sensor networks via triangular steiner tree approximation [J]. Computer Communications (CC), 2011, 34(16): 1932-1941.
- [11] Basu P, Redi J. Movement control algorithms for realization of fault-tolerant ad hoc robot networks [J]. IEEE Network, 2004, 18(4): 36-44.
- [12] Abbasi A A, Younis M F, Baroudi U A. Recovering from a node failure in wireless sensor-actor networks with minimal topology changes [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (TVT), 2013, 62(1): 256-271.
- [13] Joshi Y K, Younis M. Autonomous recovery from multi-node failure in Wireless Sensor Network [C]. Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012: 652-657.
- [14] Abbasi A A, Younis M, Akkaya K. Movement-assisted connectivity restoration in wireless sensor and actor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS), 2009, 20(9): 1366-1379.
- [15] Younis M, Lee S, Abbasi A A. A localized algorithm for restoring internode connectivity in networks of moveable sensors [J]. IEEE Transactions on Computers (TC), 2010, 59(12): 1669-1682.
- [16] Imran M, Younis M, Said A M, et al. Partitioning detection and connectivity restoration algorithm for wireless sensor and actor networks [C]. In: IEEE/IFIP 8th International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC), New York, USA: IEEE, 2010: 200-207.
- [17] Akkaya K, Senturk I F, Vemulapalli S. Handling large-scale node failures in mobile sensor/robot networks [J]. Journal of Network and Computer Applications 2013, 36(1): 195-210.
- [18] Lee S, Younis M. Recovery from multiple simultaneous failures in wireless sensor networks using minimum steiner tree [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing 2010, 70(5): 525-536.
- [19] Akkaya K, Thimmapuram A, Senel F, et al. Distributed recovery of actor failures in wireless sensor and actor networks [C]. In: Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), New York, USA: IEEE, 2008, 2480-2485.

- [20] Imran M ,Younis M ,Said A M ,et al. Volunteer-instigated connectivity restoration algorithm for wireless sensor and actor networks [C]. In: IEEE International Conference on Wireless Communications ,Networking and Information Security (WCNIS) ,New York , USA: IEEE 2010: 679-683.
- [21] Tamboli N ,Younis M. Coverage-aware connectivity restoration in mobile sensor networks[J]. Journal of Network and Computer Applications 2010 ,33(4) : 363-374.
- [22] Razafindralambo T ,Simplot-Ryl D. Connectivity preservation and coverage schemes for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control (TAC) 2011 ,56(10) : 2418-2428.
- [23] Das S ,Liu H ,Kamath A ,et al. Localized movement control for fault tolerance of mobile robot networks[C]. IFIP First International Conference on Wireless Sensor and Actor Networks (WSN) , New York ,US: Springer 2007: 1-12.
- [24] Poduri S ,Pattem S ,Krishnamachari B ,et al. Using local geometry for tunable topology control in sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC) 2009 ,8(2) : 218-230.
- [25] Mi Z ,Yang Y. Connectivity restorability of mobile Ad Hoc sensor network based on K-Hop neighbor information[C]. In: IEEE International Conference on Communications (ICC) ,New York ,USA: IEEE 2011: 1-5.
- [26] Yan Z ,Chang Y ,Jiang H ,et al. Fault-tolerance in wireless ad hoc networks: bi-connectivity through movement of removable nodes [J]. Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC) , 2013 ,13(12) : 1095-1110.

附中文参考文献:

- [3] 李文锋 ,符修文. 无线传感器网络抗毁性[J]. 计算机学报 ,2015 ,38(3) : 625-647.
- [5] 韩志杰 ,吴志斌 ,王汝传 ,等. 新的无线传感器网络覆盖控制算法[J]. 通信学报 ,2011 ,32(10) : 174-184.

本刊检索与收录

国内

中文核心期刊

中国学术期刊文摘(中英文版) 收录

中国科技论文与引文数据库来源期刊(中国科技核心期刊)

中国科技论文统计源期刊

中国期刊全文数据库(CJFD) 收录期刊

中国科技期刊精品数据库收录期刊

中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED) 收录期刊

中国核心期刊(遴选) 数据库收录期刊

中文科技期刊数据库收录期刊

国际

英国《科学文摘》(INSPEC)

荷兰《文摘与引文数据库》(SCOPUS)

俄罗斯《文摘杂志》(AJ ,VINITI)

美国《剑桥科学文摘(自然科学) 》CSA(NS) ; Cambridge Scientific Abstracts(Natural Science)

美国《剑桥科学文摘》CSA(T) ; Cambridge Scientific Abstracts(Technology)

美国《乌利希期刊指南》UPD(Ulrich's Periodicals Directory)

日本《日本科学技术振兴机构中国文献数据库》(JST ,China)

波兰《哥白尼索引》(IC ,Index of Copernicus)